

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



**Requerimientos Hídricos y de Riego para Cultivos de Interés
Agronómico bajo Escenarios de Cambio Climático en las Regiones
Centro y Carbonífera del Estado de Coahuila.**

Por:

CÉSAR ALBERTO ACALCO JUÁREZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para

Obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Marzo del 2010.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Requerimientos Hídricos y de Riego para Cultivos de Interés Agronómico bajo
Escenarios de Cambio Climático en las Regiones Centro y Carbonífera del
Estado de Coahuila.

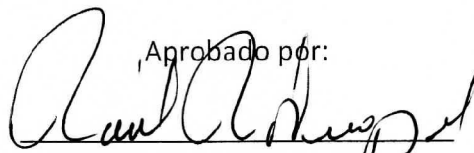
Realizado por:

CÉSAR ALBERTO ACALCO JUÁREZ

Que somete a Consideración del H. Jurado Examinador como Requisito
Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Aprobado por:



Dr. Raúl Rodríguez García
PRESIDENTE DEL JURADO



M.C. Oscar Lemus Ramírez
SINODAL



Dra. Diana Jasso Cantú
SINODAL



Dr. Raúl Rodríguez García

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Marzo del 2010.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS NUESTRO PADRE CELESTIAL. Por darme unos padres maravillosos que me enseñaron tú palabra, para ser un hombre de bien y, te doy las gracias por la dicha de tener una esposa y un hijo que son lo más hermoso y valioso para mí. Tú señor que estuviste siempre conmigo en las pruebas más difíciles que tuve que pasar para lograr esté sueño de ejercer una carrera profesional. Gracias por darme la sabiduría, el razonamiento, la humildad y la inteligencia para enfrentar los problemas de la vida. Te agradezco por escuchar mis oraciones, mis suplicas y por todas las bendiciones que me has dado.

A MIS PADRES. Les estoy muy agradecido por el esfuerzo y la dedicación que me han brindado durante mis estudios de preescolar, primaria, secundaria, nivel medio y superior, para obtener una mejor vida. Gracias por el amor, el cariño y la fe que han puesto en mí en cada momento de mi vida a pesar de mi mal comportamiento que a veces he tenido hacia ustedes papas.

AMI UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO" Por darme la oportunidad de formarme como profesionista en mi "ALMA TERRA MATER". Asimismo, te agradezco por los servicios que me brindaste como: maestros, comedor, internado, transporte y biblioteca etc., ya que de ellos fueron parte para lograr mi mayor tesoro.

A MIS SUEGROS. Sra. Abelda y el Sr. Domingo. Les agradezco con todo mi corazón por la confianza, el cariño y por verme apoyado con los gastos de mi hijo y esposa, para mí en esta situación era muy difícil darles una vida adecuada.

A MIS COMPADRES. Norma y Reynaldo. Por haber bautizado a mi hijo y por tomar una responsabilidad importante como es este sacramento.

A MIS CUÑADOS (A). Perla Jannet, Idalia, Eimer Antonio, Julio, Jairo, José Domingo y José Eduardo.

AL ING. JOSE JIL CABRERA HERNANDEZ. Le agradezco por la ayuda que me ofreció al llegar a esta universidad ya que fue parte para poder entrar a ella y cumplir mi meta de ejercer una carrera de ingeniería. Asimismo, por todas las molestias que le di durante los cuatro años y medio en esta institución.

A MIS AMIGOS (A). *Toña, José Luís y Alejandro* por la confianza que me depositaron y por aquellos momentos de felicidad que tuvimos en Tepalcingo, Morelos. *Carlos Alán, Edgar, Daniel, Alejandro, Eliseo y Alfredo*, por la amistad y el tiempo que compartimos juntos en el dormitorio el paraíso cuarto No. 4. *Rocío Isabel, Jazmín, José Ángel y Víctor*, gracias por el apoyo mutuo que me han brindado. *Clara, Mónica, Rosaura y Fide*, les agradezco por el gran aprecio y respeto que han tenido hacia mí.

A LOS MAESTRO (A). Manuela Bolívar Duarte, Gerardo Sánchez Martínez, Sergio Garza Vara, Javier J. Cortes Bracho, Raúl Rodríguez García y Oscar Lemus Ramírez.

A MIS "ASESORES". *Dr. Raúl y al M.C. Oscar* Les agradezco por la oportunidad y la confianza, para formar parte de este trabajo ya que será el último paso para concluir mis estudios en esta institución. Además, les doy las gracias por el asesoramiento y el tiempo dedicado para llevar a cabo el trabajo de tesis y así poder presentar el examen profesional para obtener mi título de Ingeniero Agrónomo en Irrigación.

A MIS PRIMOS (A) Y SOBRINOS (A). Florencia, Socorro, Petra, Lorena, Liliana, Lulú, Estela, Hilda, Chave, Marlen, Angélica, Lucero, Rocío, Miriam, Mimí, Marce (+), Alejandro, Veto, Martin, Carlos, Gerardo, Juan, Arturo, Alfredo (+), Luis, Tico, Oscar, Eliel, Lalo, Daniel, Josué etc.

DEDICATORIAS

A DIOS NUESTRO SEÑOR

Por darme la vida, por la oportunidad de concluir mis estudios de nivel licenciatura y poder realizar el trabajo de tesis, para presentar el examen profesional y así obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Irrigación. También por los momentos de alegría, tristeza que pase con: mis padres, mi esposa e hijo, mis hermanos, mis abuelitos, mis tíos(a), mis suegros, mis primos(a) y amigos(a) etc.

A MIS PADRES

A ustedes que me dieron la confianza y el apoyo para venirme a estudiar tan lejos del hogar y poder hacer realidad mi sueño de tener una profesión e ir creciendo día con día.

Sra. Nicolasa Juárez Aguilar. Tú Mama que me diste lo más sagrado de tu ser “la vida” y que siempre me proteges y me ha cobijas de los peligros de la vida. Asimismo, por la dedicación y los consejos que me diste.

Sr. Refugio Acalco Vásquez. Tú Papa que me has dado la dicha de ser tú hijo y que siempre has pensado en lo mejor para mí. También por los consejos y regaños que me han servido de mucho para solucionar problemas de la vida.

A MI ESPOSA

Esmeralda Rubí Pliego Acosta. Por permitirme ser parte de ella y por compartir lo más valioso de su vida al darme la dicha de ser padre y esposo. Así también por todo el amor y el cariño que me ha dado desde que nos conocimos y, por estar siempre a mí lado apoyándome en las buenas y en las malas para poder realizar este proyecto y así cumplir mi objetivo.

A MI HIJO

Fernando Zurriel Acalco Pliego. Porque eres lo más sagrado que Dios me ha enviado a mí vida, ya que serás de aquí en adelante mi mayor fortaleza para enfrentar cualquier obstáculo de la vida. Por tí e puesto el mayor empeño en este trabajo de tesis.

A MIS HERMANOS

Celene Acalco Juárez
Silverio Acalco Juárez *Alma Delia Acalco Juárez*

A ustedes por el gran cariño que les tengo ya que son en mí el ejemplo en muchas cosas para seguir adelante. También por el apoyo incondicional que me han dado.

A MIS ABUELITOS

Silverio Acalco Garcia (+) *Damaceno Juárez Vara (+)*
Jovita Vásquez Tepango (+) *Margarita Aguilar Salazar*

Por los consejos que me dieron cada uno de ustedes ya que me han servido para enfrentar las barreras y solucionar problemas que se me presentan día con día. Además por darme unos padres tan buenos y lindos.

A MIS TIOS(A)

Carmelita, Guadalupe, Manuela (+), Marina (+), María (+), Lola, Chole, Selsa, Licha (+), Rafa, Esther, Policarpo, Manuel, Merced, Mariano. Por compartir momentos de alegría y tristeza con todos y cada uno de ustedes, también por los consejos y apoyos que me dieron para poder terminar mis estudios profesionales.

A MIS PADRINOS DE BAUTIZO

Sr. Jorge y Sra. María e hijos Omar y Alí. Por el compromiso que tomaron ante Dios.

INDICE DE CONTENID O

	Pág.
AGRADECIMIENTOS -----	i
DEDICATORIAS -----	iii
INDICE DE CONTENIDO -----	v
INDICE DE CUADROS -----	vi
INDICE DE FIGURAS -----	vii
INTRODUCCIÓN -----	1
OBJETIVO -----	2
REVISION DE LITERATURA -----	3
Ubicación Geográfica del Estado de Coahuila -----	3
Regiones Centro y Carbonífera -----	4
Procesos de Evapotranspiración -----	5
Conceptos de Evapotranspiración -----	6
Requerimientos Hídricos de los Cultivos -----	7
Escenarios de Cambio Climático para México -----	8
Modelos de Simulación de Cultivos -----	10
Programación de Riego -----	11
MATERIALES Y METODOS -----	13
RESULTADOS Y DISCUSSIONES -----	18
CONCLUSIONES -----	31
RESUMEN -----	32
LITERATURA CITADA -----	33
DIRECCION DE CONSULTA EN INTERNET -----	38
APÉNDICES -----	39

INDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1.- Información agrícola de los cultivos.-----	14
Cuadro 2.- Valores de profundidad radicular y agotamiento permisible -----	14
Cuadro 3.- Incrementos de temperatura (°C), para los tres MCG bajo el escenario de emisiones A1B, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático-----	15
Cuadro 4.- Incrementos o decrementos de precipitación (%), para los tres MCG bajo el escenario de emisiones A1B, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático -----	16
Cuadro 5.- Valores de coeficientes de cultivo (Kc) -----	16
Cuadro 6.- Estaciones meteorológicas de las Regiones Carbonífera y Centro consideradas para el análisis. -----	17
Cuadro 7.- Valores Totales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Maíz bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro. -----	20
Cuadro 8.- Porcentajes de incremento o decremento de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Maíz bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro. -----	21
Cuadro 9.- Valores Totales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Frijol bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro. -----	23

Cuadro 10.- Porcentajes de incremento o decremento de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Frijol bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro. ----- 24

Cuadro 11.- Valores Totales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Sorgo bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro. ----- 26

Cuadro 12.- Porcentajes de incremento o decremento de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Sorgo bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro. ----- 27

Cuadro 13.- Valores Totales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Trigo bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro. ----- 29

Cuadro 14.- Porcentajes de incremento o decremento de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Trigo bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro. ----- 30

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.- Ubicación geográfica del Estado de Coahuila. -----	3
Figura 2.- Ubicación geográfica de la región Centro-Desértico.-----	4
Figura 3.- Ubicación geográfica de la región Carbonífera.-----	4

INTRODUCCION

En México, aproximadamente, el 80 por ciento del territorio nacional corresponde a zonas áridas y semiáridas (Leal, 1978). Las regiones de la zona norte de México serán de las más afectadas por el cambio climático ya que en estas regiones se prevé una mayor sequía debido a la reducción en 20 por ciento de la disponibilidad de agua y daños en la agricultura.

El comportamiento del sistema climático, afectado por el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, se encuentra en constante evolución. Este comportamiento se puede representar a través de modelos que simulan el comportamiento presente y futuro del clima y cuyos resultados son utilizados en la construcción de escenarios climáticos. El estudio del país (Gay, 1995,1996) proporciona escenarios para México en condiciones de doblamiento en las concentraciones atmosféricas de CO₂. Este estudio presenta un México muy afectado y vulnerable con incrementos en las temperaturas de entre 2 y 4°C en todo el país, con problemas crecientes de sequía y erosión y en el manejo de recursos hídricos. El cambio climático ha provocado este año en el país pérdidas por 15, 000 millones de pesos en la producción de granos básicos pues se han alternado periodos de sequía con días de lluvias torrenciales lo cual impacta los costos agrícolas. En México se estima que una de cada tres entidades padece estragos severos por la ausencia de lluvia y el sobrecalentamiento global. Datos de la Secretaria de Agricultura destacan que hay una disminución en la producción de granos en maíz debido a la reducción de 402,000 hectáreas de cultivo como consecuencia de la sequía, para el caso del frijol y sorgo 86,700 y 97,600 hectáreas respectivamente. Asimismo las afectaciones severas registradas por la sequia se tienen en 312,937 hectáreas de maíz, sorgo, trigo y frijol

principalmente. En el caso del maíz, México tiene un rendimiento de 3 t/ha; en Estados Unidos 10t/ha. y en China 5 t/ha.

Los ciclos vegetativos y los rendimientos cuantitativos y cualitativos de las plantas cultivadas están vinculados con numerosos elementos del entorno, pero son la temperatura y la precipitación los que, por sus efectos directos, acusan las más estrechas relaciones con los cultivos (De Fina y Ravelo, 1973).

En 20 años se espera el incremento de la temperatura en un grado centígrado en la zona norte del país y la disminución en 20 por ciento de la precipitación pluvial. Considerando que Coahuila se ubica en esta zona, donde las condiciones de disponibilidad de agua son limitantes, con los acuíferos sobre explotados, se requiere predecir cuales serán los efectos del cambio climático sobre los requerimientos hídricos de los cultivos, que permita utilizar esta información para evaluar el impacto en la disponibilidad de agua para la agricultura y elaborar las estrategias de adaptación que permitan hacer un uso más eficiente del recurso hídrico.

OBJETIVO

El presente trabajo tuvo la finalidad de estimar los requerimientos hídricos y de riego de maíz, frijol, sorgo y trigo para las regiones Centro y Carbonífera del Estado de Coahuila bajo escenario de cambio climático.

REVISION DE LITERATURA

Ubicación Geográfica del Estado de Coahuila

Coahuila de Zaragoza es el tercer estado más grande, que forma parte de los Estados de México, se localiza en el noreste de México y comparte una frontera de 512 kilómetros con Texas. Tiene 38 municipios y está dividido en 5 regiones: región Lagunera, Sureste, Centro desierto, Carbonífera y Norte. Su capital es Saltillo. Se limita en el norte por Texas, (EE.UU.), en el este por Nuevo León, en el sur por San Luis Potosí y Zacatecas, en el oeste por Durango y Chihuahua. Las coordenadas geográficas están en el norte por 29° 53' latitud norte y 24° 32' en el sur; en el este por 99° 51' longitud oriental y 103° 68' en el oeste. Se localiza a una distancia aproximada de 872 Km. de la capital del País.

La extensión del estado de Coahuila con sus grandes campos desérticos y semidesérticos y una extensión de 151,571 kilómetros cuadrados, que representan un 7.74% del total de la superficie del País.



Figura 1. Ubicación geográfica del Estado de Coahuila.

Regiones Centro y Carbonífera

Ubicación Geográfica

La Región Centro, está conformada por los municipios de Abasolo (7), Candela (6), Castaños (5), Escobedo (9), Frontera (2), Lamadrid (4), Monclova (1), Nadadores (13), Sacramento (3) y San Buenaventura (8). La Región Centro - Desierto cuenta con una extensión territorial de 55,133 Km² y una población de 356,493* habitantes. La Región Carbonífera, está conformada por los municipios de Juárez (4), Múzquiz (3), Progreso (5), Sabinas (1) y San Juan de Sabinas (2). Cuenta con una extensión territorial de 16,040.1Km² y una población de 160,639* habitantes.



Figura 2. Ubicación geográfica de la región Centro - Desértico

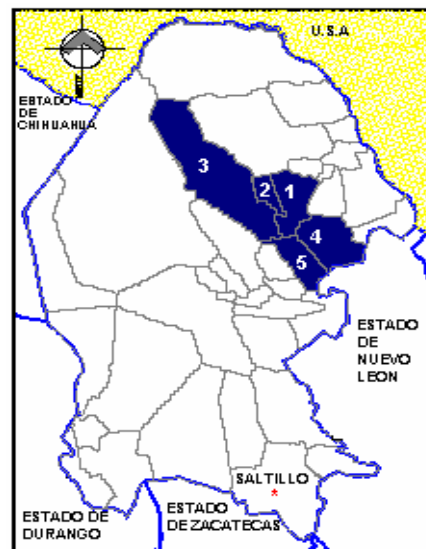


Figura 3. Ubicación geográfica de la región Carbonífera

Clima

El estado de Coahuila se localiza en un área de desierto. El clima es generalmente seco y caliente en las tierras bajas, y templado en los niveles más altos. En la región

Centro existen diversos tipos de climas, tales como secos, áridos y semiáridos. En algunas partes predomina el semiseco o semiárido con régimen de lluvias intermedio. En verano hay lluvias que pueden ser intensas. Los inviernos son fríos. En la región Carbonífera, al centro de la entidad, prevalece un clima semiseco, semiárido y semicálido, con un régimen de lluvias escaso. En verano hay lluvias que pueden ser intensas. Los inviernos son fríos.

Proceso de Evapotranspiración

El estudio de los procesos de la evapotranspiración ayuda a modelar predecir e incrementar los rendimientos de los cultivos (Baldocchi et al., 1983). Se conoce como evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos por los cuales ocurre el flujo de vapor de agua del cultivo hacia la atmósfera, por evaporación de la superficie del suelo y por la transpiración de las plantas (Delegido et al., 1991). Ambos procesos dependen de diferentes factores. En el caso de la evaporación: del tipo de suelo, de la disponibilidad de agua y de la demanda del clima o factores climáticos (radiación solar, la temperatura y humedad del aire y la velocidad del viento). La transpiración puede estar influenciada por factores de índole fisiológico y aerodinámico asociados a las diferentes especies vegetales, así como a la disponibilidad de agua y demanda del clima (Fernández y García., 1995).

El seguimiento de la evapotranspiración tiene importantes implicaciones en la modelización global y regional del clima y del ciclo hidrológico, así como para asesorar sobre el estrés medio ambiental que afecta los ecosistemas agrícolas y naturales (Kustas y Norman, 1996).

Los métodos basados en la medida del balance hídrico y, entre ellos el cálculo de la evapotranspiración, han sido ampliamente usados para estimar los efectos del cambio climático (McKenney y Rosenberg, 1993).

Conceptos de Evapotranspiración

Thornthwaite definió evapotranspiración como la cantidad de agua necesaria para la transpiración de una cubierta vegetal en una zona con agua suficiente. Pero el suelo, no siempre dispone de agua suficiente para satisfacer las demandas de evapotranspiración, por lo que tanto Thornthwaite como Penman, introdujeron en 1948 una distinción entre la evapotranspiración potencial (ET_p) y la real (ET_r) es decir, aquella que se produce realmente en base a las disponibilidades de agua. (Fernández y García, 1995).

Como el concepto de Evapotranspiración potencial (ET_p) es difuso, debido a que cada tipo de planta evapotranspira una cantidad de agua diferente, se han establecido los siguiente conceptos (Dorenbos y Pruitt, 1997; Allen et al., 1998): Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$).

La evapotranspiración del cultivo de referencia es un parámetro relacionado con el clima y se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa de gramíneas verdes, de 8 a 15 cm de altura, uniforme, en crecimiento activo, que sombrean completamente el suelo y que no tiene limitaciones de agua (Doorenbos y Pruitt, 1975). Posteriormente, el concepto se hizo más preciso y se definió como la tasa de evapotranspiración de una superficie extensa y uniforme de gramíneas en crecimiento activo y sin limitaciones de agua, con 12 cm de altura, un valor fijo de resistencia de la superficie de $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998).

La evapotranspiración de un cultivo en condiciones estándar (ET_c), se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y adecuado aporte de agua y que logra máxima producción de acuerdo a las

condiciones climáticas. Es la evapotranspiración que se producirá en un cultivo especificado, sano, bien abonado y en condiciones optimas de humedad del suelo. Es igual a la anterior (ET_o) multiplicada por un coeficiente (K_c) correspondiente al tipo de cultivo: $ET_c = ET_o * K_c$ (Doreenbos y Pruitt, 1977; Allen et al., 1998).

La evapotranspiración de un cultivo en condiciones no estándar (ET_{caj}), es la evapotranspiración que se producirá cuando no cumple las condiciones ideales. Es preciso ajustar el coeficiente del cultivo K_c (si las plantas no están bien desarrolladas, o no cubren toda la superficie, etc.) y multiplicar por otro coeficiente K_s que depende de la humedad del suelo (Doreenbos y Pruitt, 1977; Allen et al., 1998).

Requerimientos Hídricos de los Cultivos

El procedimiento, que fue presentado por primera vez en la publicación de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO No. 24, “Las Necesidades de Agua de los Cultivos”, se denomina como el enfoque de ($K_c ET_o$), donde los efectos del clima sobre los requerimientos de agua del cultivo vienen reflejados en la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y el efecto del cultivo se incorporan el coeficiente del cultivo (Allen et al., 1977).

El conocimiento de los requerimientos de agua es útil para tomar decisiones de manejo que permitan lograr la mayor coincidencia entre la oferta natural de agua (lluvia) y la demanda del cultivo, así como para definir la necesidad de riego. Estos requerimientos varían a lo largo de la estación de crecimiento y entre especies, entre cultivares y entre ambientes (Della Maggiora et al., 2000).

El coeficiente de cultivo (K_c) se obtiene experimentalmente para diferentes cultivos a partir de la relación ET_c/ET_o , este varía con el tipo de cultivo, estado vegetativo, clima y cubierta del suelo. Una de las formas de obtenerlo puede ser

mediante el empleo de lisímetros o a partir del balance hídrico a nivel de parcela (Cooperative Extension Service, 2001a).

El consumo de agua de los cultivos está directamente influenciado por las condiciones ambientales que se dan en cada campaña. Entre las variables que más influyen están la temperatura, radiación solar, humedad relativa y viento. (Caviglia y Colab, 1999).

Según Coras (2004) manifiesta que el exceso de agua sobre la superficie a consecuencia de lluvias de alta intensidad es perjudicial para los cultivos en diversas fases fenológicas; contrariamente, las condiciones de mínima precipitación (sequía), les ocasionan marchitamiento y hasta la muerte.

Escenarios de Cambio Climático para México

Una de las formas más utilizadas actualmente para estudiar el impacto de un cambio climático sobre los sistemas agrícolas y pecuarios, es evaluando escenarios futuristas de cambio en modelos computacionales de simulación de crecimiento de cultivos. Estos permiten analizar el comportamiento durante el ciclo del cultivo, bajo diferentes marcos climáticos, obteniendo resultados sobre los efectos de variaciones en la temperatura, la precipitación y la radiación solar, principalmente (Villalobos y Retana , 1999). Los escenarios futuristas del clima son generados a partir de Modelos de Circulación General (MCG) (Gay, 2004), los cuales ofrecen estimados mensuales de la temperatura y las precipitaciones futuras en cuadrículas de alrededor de 3° de lado, teniendo en cuenta distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2000). Las predicciones de los (MCG) son para un área demasiado grande y no son útiles para la toma de decisiones agrícolas, donde se observan cambios notables de relieve a pocos kilómetros, por lo cual se requieren de técnicas para cambiar la escala de las predicciones (Utset 2003). Entre estas técnicas se encuentran los llamados

generadores de tiempo (Wilby y Wigley, 2000), los cuales ofrecen valores diarios de las variables meteorológicas, estadísticamente equivalentes a las series históricas del lugar, pero alteradas de acuerdo a los pronósticos del cambio climático predicho por el MCG (Semenov and Jamieson, 2000).

Estimaciones de la disponibilidad de agua en México indican que cerca del 70% de la población vivirá en regiones con bajo abastecimiento de agua al inicio de la primera cuarta parte del siglo 21(Izmailova and Moiseenko, 1998).

De acuerdo con proyecciones de cambio climático, aproximadamente el 70% de los bosques de las regiones templadas de México pueden ser afectadas por el cambio (Villers y Trejo 1998). Otros estudios de vulnerabilidad, sugieren que 10% de todos los tipos de vegetación en los ecosistemas del norte del país incluyendo tierras de bosques y arbustos en el sur de Chihuahua, este de Coahuila y norte de Zacatecas y San Luis Potosí pueden ser afectadas por condiciones de sequía y calor resultando en el incremento de bosques de trópico seco o muy seco y matorral xerofítico (Gay et al., 1996).

Las manifestaciones del cambio climático deben promover acciones de adaptación para evitar o mitigar los efectos negativos, las cuales pueden implementarse a nivel predio agrícola, en el ámbito nacional o mundial. Las adaptaciones a diferentes niveles deben ser investigadas para su futura aplicación. A nivel predio agrícola abarca acciones como el cambio en los tiempos, frecuencias y localización de los cultivos; adopción de nuevas variedades o la combinación de distintos tipos de cultivos; adopción de tecnologías y prácticas de cultivo que contribuyan a preservar las condiciones ambientales originales, como la irrigación; y la investigación y desarrollo en nuevas variedades que se puedan adaptar mejor a un clima cambiante, entre otros. En el ámbito nacional, se puede investigar cambios en el uso de insumos agrícolas (e.g tierra, agua, calidad genética de las semillas) y en los niveles de producción (cantidad y

calidad), los cuales se propagarían al resto de la economía (Mendelshon, 2000; Rosenzweig et al., 2004; Seo, N.; Mendelsohn, R. 2007a). Las variaciones de precios relativos derivadas de esos cambios pueden inducir a procesos de sustitución de cultivos e insumos, así como a cambios en la oferta y la demanda de bienes agrícolas y no agrícolas. Los vínculos entre los impactos del cambio climático y las variaciones de precios relativos demandan la necesidad de generar nuevas tecnologías y prácticas agrícolas que incidan en los precios. Cuanto mayor sea la capacidad de la economía para adaptarse a esas transformaciones, menores serán los impactos.

Modelos de Simulación de Cultivos

Según Soto et al., (2004) los modelos de simulación respecto a cultivos agrícolas son una categoría de modelos ambientales que, típicamente, predicen el rendimiento de los cultivos, el crecimiento y desarrollo de las plantas, y la dinámica de la humedad y otros nutrientes. Como herramienta de planificación permiten cuantificar a través de la predicción el impacto de los procesos de erosión, contaminación por agroquímicos, distintas estrategias ante el cambio climático y el pronóstico de rendimiento a nivel regional (Boote et al, 1996).

Los modelos de simulación de cultivos se han combinado en un paquete, como parte de un programa de enlaces (*software shell*) conocido como Sistema de Apoyo para Decisiones de Transferencia de Agrotecnología (*DSSAT*, por sus siglas en inglés) (Jones et al., 1998). Los modelos de simulación de cultivos del *DSSAT* utilizan archivos de datos para clima, suelo y manejo del cultivo. Estos archivos se utilizan para proveer en la simulación un ambiente parecido a donde crece el cultivo. El *DSSAT*, además, incluye varios programas de aplicación para análisis estacionales (Thornton et al., 1994), rotación de cultivo y análisis secuencial (Thornton et al., 1995), y análisis espacial a escala de campo o regional (Engel et al., 1997; Thornton et al., 1997). Los modelos proveen una de las mejores aproximaciones del comportamiento de los

cultivos, integrando nuestro entendimiento de los procesos complejos de las plantas influenciados por el clima, el suelo y las condiciones de manejo (White et al., 2003).

El modelo ISAREG es una herramienta de simulación para computar el equilibrio del agua del suelo, generadora de alternativas de riego y evaluar los relativos impactos en los rendimientos de los cultivos. Básicamente el balance del agua sigue lo sugerido por Doorembos y Pruitt (1977) y descrito por Texeira y Pereira (1992) y Liu et al., (1998). Esta versión del modelo utilizada (Pereira et al., 2003) adopta la metodología puesta al día para computar evapotranspiración de cultivo y necesidades de riego propuesto por Allen et al., (1998).

El CropWat es un programa que utiliza el método de la FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de los cultivos (ET). Los valores de ET son utilizados posteriormente para estimar los requerimientos de agua de los cultivos y el calendario de riego (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998). El programa CROPWAT 8.0 puede ser descargado de la siguiente dirección: http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html.

Programación de Riego

Para programar el riego es esencial estimar tanto la evapotranspiración real y la cantidad de agua que puede almacenar el suelo en la zona de raíces. La programación de riego es entonces un procedimiento que permite establecer el momento oportuno del riego y la cantidad exacta de agua a aplicar en cada período fenológico. Sin embargo, esta técnica requiere de la calibración local de algunos parámetros incorporados en su algoritmo tales como coeficiente de cultivo y criterio de riego (Ortega y Farías et al., 2003).

En varios países del mundo se observa una fuerte tendencia a usar estaciones meteorológicas automáticas para programar el riego y así optimizar el uso del agua en

la producción de frutales, viñas, hortalizas y cultivos. Así por ejemplo, en Australia, Chile, España, México y Estados Unidos entre otros, se han establecido redes de estaciones meteorológicas automáticas interconectadas vía telefónica celular, radio e Internet, con el objeto de ofrecer diferentes servicios entre los cuales destaca la “programación de riego” (Carlson et al., 1998; Craddock, 1990; López y López, 1992; Snyder y Pruitt, 1985; Snyder et al., 1984; Sickler, 1998).

El balance hídrico regional se caracteriza por ser imprevisible, y manifestar extremos hídricos como el riesgo de sequías e inundaciones y de poseer deficiencias que se producen marcadamente durante el verano. Lo que lleva a concluir que es conveniente abastecer de agua al cultivo por medio del riego en épocas desfavorables (Contreras, 2004).

La agrometeorología se encarga de favorecer el incremento de la producción agrícola aprovechando principalmente los recursos del tiempo y del clima, uno de sus objetivos primordiales es estimar el momento oportuno del riego (Ramón y Arteaga, 1989).

MATERIALES Y METODOS

La metodología para realizar este estudio, se desarrolló en las siguientes etapas: a) recopilación de la información agrícola y climática; b) procesamiento de la información climática; c) estimación de los requerimientos hídricos y de riego para diferentes escenarios climáticos.

Recopilación de la Información Agrícola y Climática

Información Climática

Los datos promedios de normales climatológicas como son temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (Km. /día), intensidad de la radiación solar (horas) y precipitación (mm) del periodo 1971-2000 de doce estaciones meteorológicas de la región Centro y seis en la región carbonífera del estado de Coahuila (Apéndice 1), fueron obtenidas de la fuente (Guillermo Crespo Pichardo, crespopg@yahoo.com). También se obtuvo la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas ubicadas en las regiones (Cuadro 6).

Información Agrícola

La estimación de los requerimientos hídricos en las dos regiones, en condiciones de cambio climático se efectuó para los cultivos de maíz, frijol, sorgo y trigo. La información de los cultivos se observa en el cuadro 1 y 2

En la región centro predomina el suelo tipo: xerosol, rendzina, yermosol y vertisol, con una textura arcillosa con una humedad disponible de 25 cm/m. En la región carbonífera predomina el suelo tipo: xerosol, rendzina, vertisol y feozem, con una textura migajón arcilloso y una humedad disponible de 22 cm/m.

Cuadro 1. Información agrícola de los cultivos.

Cultivos	Ciclo en días	Fecha de inicio de ciclo	Fecha de fin de ciclo
Maíz	125	30 de abril	01 de enero
Frijol	100	25 de abril	02 de agosto
Trigo	130	01 de diciembre	09 de abril
Sorgo	125	20 de mayo	21 de septiembre

Cuadro 2. Valores de profundidad radicular y agotamiento permisible.

Cultivos	Profundidad radicular (m)	Agotamiento permisible (fracción)
Maíz	0,90	0.50
Frijol	0,70	0.50
Sorgo	0,90	0.60
Trigo	0,70	0.50

Procesamiento de la Información Climática

Los escenarios de cambio climático, en temperatura del aire y precipitación para los años 2030 y 2050 para las dos regiones agrícolas consideradas en el estudio, fueron elaborados por el Grupo de Cambio Climático del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (Conde et al., 2008), quienes han seleccionado tres modelos de circulación general, que representan razonablemente el clima observado y permiten mostrar un rango de incertidumbre, estos son: MPI ECHAM5, el HADGEM1 y el GFDL CM 2.0. Utilizando el programa Surfer 8 se descargaron las diferencias de temperatura (Cuadro 3) y precipitación (Cuadro 4) para cada estación de acuerdo a las coordenadas geográficas. En este estudio se consideró el escenario de emisiones A1B.

En base a la información obtenida de datos históricos (normales históricos) y los datos de los escenarios climáticos, se calcularon los valores de temperatura y precipitación para los tres modelos (MCG); para los escenarios 2030 y 2050.

El modelo de simulación CropWat 8.0 de la FAO Penman-Monteith se utilizó para estimar la ET_o a nivel mensual en mm/día, así como la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar para los datos históricos y para datos con los cambios debido a los escenarios de cambio climático propuestos en las dos regiones consideradas. En el cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándares y los requerimientos de riego, los porcentajes de agotamiento (o abatimiento) de la humedad disponible y la profundidad radicular considerados se observa en el cuadro 2, los valores de coeficientes de cultivo (k_c) se presentan en el cuadro 5.

Cuadro 3. Incrementos de temperatura (°C), para los tres MCG bajo el escenario de emisiones A1B, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático.

Temperatura						
Mes	MPIECHAM 5		HADGEM 1		GFDL CM 2.0	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Enero	0,88	1,52	0,67	1,19	-0,04	0,03
Febrero	1,15	1,64	0,83	1,14	1,52	2,24
Marzo	0,74	1,02	1,87	2,83	0,51	0,65
Abril	0,87	2,11	1,45	3,04	0,66	1,76
Mayo	1,73	2,34	0,61	0,54	2,22	3,13
Junio	1,82	2,64	1,72	2,48	1,07	1,44
Julio	1,24	2,12	1,31	2,23	0,76	1,34
Agosto	1,63	2,43	1,3	1,89	1,42	2,09
Septiembre	0,61	0,65	1,66	2,34	1,54	2,13
Octubre	1,01	2,02	1,29	2,46	0,21	0,72
Noviembre	1,24	2,21	1,15	2,07	0,54	1,09
Diciembre	0,0	0,35	0,13	0,56	0,29	0,83

Cuadro 4. Incrementos o decrementos de precipitación (%), para los tres MCG bajo el escenario de emisiones A1B, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático.

Precipitación						
Mes	MPIECHAM 5		HADGEM 1		GFDL CM 2.0	
	2030	2050	2030	2050	2030	2050
Enero	26,64	52,47	-4,5	2,44	12,31	29,45
Febrero	8,67	12,33	-12,31	-21,39	28,15	43,61
Marzo	-20,87	-36,33	23,03	34,21	-12,27	-22,51
Abril	-18,3	-22,25	29,19	54,06	-26,04	-34,69
Mayo	-19,34	-5,47	-34,69	-30,15	-36,59	-33,19
Junio	-13,26	-19,35	-35,41	-54,95	30,71	51,3
Julio	-27,38	-33,17	-35,16	-45,67	37,07	70,4
Agosto	-26,04	-21,74	-14,39	-3,03	-23,65	-17,9
Septiembre	26,53	43,66	8,68	14,97	-24,97	-39,09
Octubre	-10,07	6,48	-8,93	8,31	-26,42	-19,79
Noviembre	3,84	1,35	1,22	-2,87	2,07	-1,51
Diciembre	-2,15	15,31	-5,87	9,32	20,36	51,47

Cuadro 5. Valores de coeficientes de cultivo (Kc).

Cultivos	Etapas inicial	Etapas intermedia	Etapas fin de ciclo
Maíz	0,30	1,15	0,55
Frijol	0,35	1,10	0,25
Trigo	0,30	1,15	0,20
Sorgo	0,30	1,10	0,55

Estimación de los Requerimientos Hídricos y de Riego para Diferentes Escenarios Climáticos

Los resultados de ET_o , ET_{caj} , precipitación efectiva (PPE) y requerimientos de riego (R.R.) para los cuatro cultivos, fueron agrupados en las dos regiones de acuerdo a las estaciones climatológicas que tenían características similares en altitud con pocas diferencias en latitud y longitud, como lo muestra el cuadro 6

Cuadro 6. Estaciones meteorológicas de las Regiones Carbonífera y Centro consideradas para el análisis.

Regiones		Estaciones	Altitud (msnm)	Latitud (N) (Grados)	Longitud (W) (Grados)
C A R B O N Í F E R A	1	Múzquiz	450	27,87	101,52
		Palahu Múzquiz	430	27,89	101,40
		Las Esperanzas Múzquiz	450	27,75	101,35
	2	Sabinas	339	27,85	101,12
		Conchos San Juan Sabinas	380	27,65	101,38
		Progreso	360	27,42	101,00
C E N T R O	1	Abasolo y Escobedo	430	27,18	101,43
		Rodríguez Escobedo	420	27,20	101,37
		Sacramento y Nadadores	580	27,00	101,72
		Monclova	586	26,90	101,42
	2	Candela	620	26,83	100,76
		La Madrid	640	27,04	102,10
		El Gato Ndrs. y Buenaventura	640	27,23	101,73
	3	Castaños	743	26,77	101,42
		El Márquez Castaños	860	26,64	101,36
		Bajan Castaños	900	26,53	101,26
		El Taquito Castaños	920	26,62	101,31
		Santa Teresa Castaños	1010	26,39	101,35

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el caso del maíz los valores actuales estimados en las regiones Carbonífera y Centro de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) fluctúa entre 810,3 y 845,6 mm, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}) fluctúa entre 692,0 y 717,0 mm, la precipitación efectiva (PPE) fluctúa entre 145,7 y 266,5 mm, siendo en la región Centro donde ocurre precipitación efectiva, menores de 188,0 mm y el requerimiento de riego (R.R) fluctúa entre 430,4 y 546,9 mm (Cuadro 7). La estimación de ET_o y ET_{caj} a partir de los cambios de temperatura pronosticados por los MCG (Cuadro 3), tuvieron en forma regular un incremento del 3% y 4% en el año 2030 para los tres modelos en las diferentes regiones y un incremento 4% y 5% en 2050 (Cuadro 8).

La precipitación efectiva es la variable climática donde los modelos pronostican mayor efecto del cambio climático. El modelo GFDL CM 2.0, pronostica que la PPE en 2030 disminuirá con respecto al valor actual (2% al 7%), para el 2050 la PPE aumentará de un 3% a 8% (Cuadro 8). El modelo MPIECHAM 5 estima que en la región Carbonífera y Centro habrá reducción hasta 11% para los años 2030 y 2050, será mayor en 2030 que en 2050 de 5%. De los tres modelos el HADGEM 1 es el que estima mayor efecto en la PPE, en las dos regiones la reducción será entre 19% a 25% para los dos años (Cuadro 8).

Los requerimientos de riego estimados para el modelo GFDL CM 2.0 en las regiones Centro y Carbonífera, serán pequeños, en 2030 un 4% al 8% superior que el requerimiento actual y en 2050 serán menores entre un 3 % y 5%. El modelo MPIECHAM 5 pronostica que los requerimientos de riego en 2030 y 2050 se incrementaran entre un 7% a 11%. Los mayores requerimientos de riego son pronosticados por el modelo HADGEM 1, en las dos regiones se incrementaran de un 9% al 21% para los años 2030 y 2050 (Cuadro 8).

De acuerdo con los resultados obtenidos el efecto del cambio climático tendrá una mayor influencia en la precipitación efectiva que en la evapotranspiración de los cultivos, siendo esta variable la que más influye para los requerimientos de riego se incrementen, el modelo HADGEM 1 es el que pronostica mayores requerimientos y el GFDL CM 2.0 los menores o nulos.

Cuadro 7. Valores Totales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Maíz bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro.

Regiones		Modelos (MCG)	Años	ET_o (mm)	ET_{caj} (mm)	PPE (mm)	R.R (mm)
C A R B O N Í F E R A	1	ACTUAL		827,1	696,9	266,5	430,4
		MPIECHAM 5	2030	856,8	718,6	239,6	479,0
			2050	870,2	728,2	253,7	474,5
		HADGEM 1	2030	856,8	718,6	209,8	508,8
			2050	870,2	728,2	205,8	522,4
		GFDL CM 2.0	2030	855,6	717,9	254,9	463,0
			2050	869,0	727,7	278,4	449,3
	2	ACTUAL		845,6	717,1	230,5	486,6
		MPIECHAM 5	2030	875,6	739,1	208,1	531,0
			2050	889,1	748,7	218,6	530,1
		HADGEM 1	2030	875,6	739,1	179,5	559,6
			2050	889,1	748,7	172,7	576,0
		GFDL CM 2.0	2030	875,6	739,1	226,9	512,2
			2050	889,1	748,7	248,9	499,8
C E N T R O	1	ACTUAL		810,3	692,6	145,7	546,9
		MPIECHAM 5	2030	839,3	714,7	131,4	583,3
			2050	852,9	724,4	140,0	584,4
		HADGEM 1	2030	839,3	714,7	116,9	598,0
			2050	854,0	724,8	166,7	558,1
		GFDL CM 2.0	2030	838,4	714,1	135,8	578,3
			2050	850,7	724,1	147,2	576,9
	2	ACTUAL		845,5	714,3	188,0	526,3
		MPIECHAM 5	2030	874,7	736,0	171,0	565,0
			2050	888,3	746,1	181,4	564,7
		HADGEM 1	2030	874,7	736,0	151,9	584,1
			2050	888,3	746,1	150,6	595,5
		GFDL CM 2.0	2030	874,7	736,0	178,9	557,1
			2050	888,3	746,1	194,1	552,0
	3	ACTUAL		813,0	697,0	174,3	522,7
		MPIECHAM 5	2030	841,7	718,0	155,8	562,2
			2050	854,6	727,5	164,2	563,3
		HADGEM 1	2030	841,7	718,0	138,2	579,8
			2050	854,6	727,5	135,9	591,6
		GFDL CM 2.0	2030	841,7	718,0	168,7	549,3
			2050	853,9	727,2	184,9	542,3

Cuadro 8. Porcentajes de incremento o decremento de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Maíz bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro.

Regiones		Modelos (MCG)	Años	ET_o (%)	ET_{caj} (%)	PPE (%)	R.R (%)
C A R B O N Í F E R A	1	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	4	3	-10	11
			2050	5	4	-5	10
		HADGEM 1	2030	4	3	-21	18
			2050	5	4	-23	21
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-4	8
			2050	5	4	4	4
	2	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	4	3	-10	9
			2050	5	4	-5	9
		HADGEM 1	2030	4	3	-22	15
			2050	5	4	-25	18
		GFDL CM 2.0	2030	4	3	-2	5
			2050	5	4	8	3
C E N T R O	1	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	4	3	-10	7
			2050	5	5	-4	7
		HADGEM 1	2030	4	3	-20	9
			2050	5	5	-20	2
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-7	6
			2050	5	5	1	5
	2	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	3	3	-9	7
			2050	5	4	-4	7
		HADGEM 1	2030	3	3	-19	11
			2050	5	4	-20	13
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-5	6
			2050	5	4	3	5
	3	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	4	3	-11	8
			2050	5	4	-6	8
		HADGEM 1	2030	4	3	-21	11
			2050	5	4	-22	13
		GFDL CM 2.0	2030	4	3	-3	5
			2050	5	4	6	4

En el caso del frijol, en las regiones Carbonífera y Centro los valores actuales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) oscila entre 661,4 y 689,5 mm, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}) oscila entre 523,9 y 543,2 mm, la precipitación efectiva (PPE) oscila entre 130,1 y 230,5 mm; siendo en la región Centro donde ocurre precipitación efectiva, menores de 153,0 mm y el requerimiento de riego (R.R) oscila entre 298,8 y 393,8 mm (Cuadro 9). La estimación de la ET_o y ET_{caj} a partir de los cambios de temperatura pronosticados por los MCG (Cuadro 3), tuvieron en forma regular un incremento del 3% y 4% en 2030 para los tres modelos en las diferentes regiones y un incremento del 5% en 2050 (Cuadro 10).

Por otra parte, el modelo GFDL CM 2.0 estima que en las regiones Carbonífera y Centro la PPE no son significativas en 2030 y para el 2050 aumentará entre un 10% a 15% (Cuadro 10). El modelo MPIECHAM 5 estima que en las dos regiones tendrá reducción hasta 22% para los años 2030 y 2050. De los tres modelos el HADGEM 1 es el que estima mayor reducción en la PPE, en las regiones Carbonífera y Centro estima una reducción de un 22% al 26%.

Los requerimientos de riego estimados por el modelo GFDL CM 2.0 en las regiones Carbonífera y Centro para el 2030 pronostican incremento entre 4% a 7%, pero para el 2050 no son significativas. Los modelos MPIECHAM 5 y HADGEM 1 pronostican que los requerimientos de riego en 2030 y 2050 se incrementaran entre un 12% y 27%, predominando mayor incremento en la región Carbonífera (Cuadro 10).

Cuadro 9. Valores Totales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Frijol bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro.

Regiones		Modelos (MCG)	Años	ET_o (mm)	ET_{caj} (mm)	PPE (mm)	R.R (mm)
C A R B O N Í F E R A	1	ACTUAL		672,8	529,3	230,5	298,8
		MPIECHAM 5	2030	696,9	547,6	182,3	365,3
			2050	707,9	555,1	184,6	370,5
		HADGEM 1	2030	696,9	547,6	176,1	371,5
			2050	707,9	555,1	174,8	380,3
		GFDL CM 2.0	2030	695,7	546,6	227,6	319,0
			2050	706,7	554,4	257,6	296,8
	2	ACTUAL		689,5	543,1	201,8	341,3
		MPIECHAM 5	2030	713,8	561,6	161,0	400,6
			2050	724,9	569,1	161,6	407,5
		HADGEM 1	2030	713,8	561,6	153,4	408,2
			2050	724,9	569,1	149,3	419,8
		GFDL CM 2.0	2030	713,8	561,6	205,2	356,4
			2050	724,9	569,1	232,6	336,5
C E N T R O	1	ACTUAL		661,4	523,9	130,1	393,8
		MPIECHAM 5	2030	685,0	541,9	102,4	439,5
			2050	696,2	549,6	103,9	445,7
		HADGEM 1	2030	685,0	541,9	100,6	441,3
			2050	699,7	550,8	101,0	449,8
		GFDL CM 2.0	2030	684,0	541,1	127,0	414,1
			2050	695,2	549,1	143,4	405,7
	2	ACTUAL		689,2	543,2	152,9	390,3
		MPIECHAM 5	2030	712,8	561,4	119,9	441,5
			2050	724,0	568,8	121,0	447,8
		HADGEM 1	2030	712,8	561,4	116,9	444,5
			2050	724,0	568,8	116,2	452,6
		GFDL CM 2.0	2030	712,8	561,4	152,5	408,9
			2050	724,0	568,8	173,5	395,3
	3	ACTUAL		665,9	529,1	147,8	381,3
		MPIECHAM 5	2030	689,2	546,6	116,0	430,6
			2050	700,1	554,0	116,9	437,1
		HADGEM 1	2030	689,2	546,6	112,2	434,4
			2050	700,1	554,0	110,8	443,2
		GFDL CM 2.0	2030	689,2	546,6	148,7	397,9
			2050	699,4	553,7	169,5	384,2

Cuadro 10. Porcentajes de incremento o decremento de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Frijol bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en la Región Carbonífera y Centro.

Regiones		Modelos (MCG)	Años	ET_o (%)	ET_{caj} (%)	PPE (%)	R.R (%)
C A R B O N Í F E R A	1	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	4	3	-21	22
			2050	5	5	-20	24
		HADGEM 1	2030	4	3	-24	24
			2050	5	5	-24	27
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-1	7
			2050	5	5	12	-1
	2	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	4	3	-20	17
			2050	5	5	-20	19
		HADGEM 1	2030	4	3	-24	20
			2050	5	5	-26	23
		GFDL CM 2.0	2030	4	3	2	4
			2050	5	5	15	-1
C E N T R O	1	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	4	3	-21	12
			2050	5	5	-20	13
		HADGEM 1	2030	4	3	-23	12
			2050	6	5	-22	14
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-2	5
			2050	5	5	10	3
	2	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	3	3	-22	13
			2050	5	5	-21	15
		HADGEM 1	2030	3	3	-24	14
			2050	5	5	-24	16
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	0	5
			2050	5	5	13	1
	3	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	3	3	-21	13
			2050	5	5	-21	15
		HADGEM 1	2030	3	3	-24	14
			2050	5	5	-25	16
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	1	4
			2050	5	5	15	1

Para el caso del sorgo, en las regiones Carbonífera y Centro los valores actuales estimados de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) fluctúa entre 762,2 y 797,0 mm, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}) lo son entre 625,2 y 650,0 mm, la precipitación efectiva varía entre 145,7 y 266,5 mm; siendo en la región Centro donde ocurre precipitación efectiva, menores de 188,0 mm y el requerimiento de riego (R.R) fluctúa entre 365,3 y 479,5 mm (Cuadro 11). La estimación de la ET_o y ET_{caj} a partir de los cambios de temperatura pronosticados por los MCG (Cuadro 3), tuvieron en forma regular un incremento del 3% en el año 2030 para los tres modelos en las diferentes regiones y un incremento del 4% y 5% en el 2050 (Cuadro 12).

Por su parte, el modelo GFDL CM 2.0, predice que la PPE en 2030 disminuirá de un 2% a un 7% y para el 2050 incrementará entre un 3% al 8% (Cuadro 12). El modelo MPIECHAM 5 estima que en las regiones Carbonífera y Centro habrá reducción entre 9% y 11% en 2030 y para el 2050 será de un 4% a 6%, será mayor en 2030 que en 2050 de 5%. Los mayores decrementos de PPE los predice el modelo HADGEM 1, estima que en las dos regiones para los años 2030 y 2050 serán entre un 19% y 25%.

Por último, el modelo GFDL CM 2.0 predice para el 2030 y 2050 habrá incrementos en los requerimientos de riego entre un 3% al 8% con respecto al actual en las dos regiones. El modelo MPIECHAM 5 predice que los requerimientos de riego para los años 2030 y 2050 se incrementarán de un 7% a un 13% (Cuadro 12). De los tres modelos el HADGEM 1 es el que predice los mayores incrementos en los requerimientos de riego, en las regiones Carbonífera y Centro aumentará entre un 10% a 24% en 2030 y 2050, siendo el mayor incremento en 2050 que en 2030 (de 2% a 4%).

Cuadro 11. Valores Totales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Sorgo bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro.

Regiones		Modelos (MCG)	Años	ET_0 (mm)	ET_{caj} (mm)	PPE (mm)	R.R (mm)
C A R B O N Í F E R A	1	ACTUAL		780,2	631,8	266,5	365,3
		MPIECHAM 5	2030	806,1	651,2	239,6	411,6
			2050	817,4	660,0	253,7	406,3
		HADGEM 1	2030	806,1	651,2	209,8	441,4
			2050	817,4	660,0	205,8	454,2
		GFDL CM 2.0	2030	805,4	651,0	254,9	396,1
			2050	781,3	659,8	278,4	381,4
	2	ACTUAL		797,0	650,0	230,5	419,5
		MPIECHAM 5	2030	823,3	670,1	208,1	462,0
			2050	834,7	679,0	218,6	460,4
		HADGEM 1	2030	823,3	670,1	179,5	490,6
			2050	834,7	678,5	172,7	505,8
		GFDL CM 2.0	2030	823,3	670,1	226,9	443,2
			2050	834,7	679,0	248,9	430,1
C E N T R O	1	ACTUAL		763,2	625,2	145,7	479,5
		MPIECHAM 5	2030	788,5	645,8	131,4	528,9
			2050	799,9	654,5	140,0	514,5
		HADGEM 1	2030	788,5	645,8	116,9	528,9
			2050	800,1	654,5	116,7	537,8
		GFDL CM 2.0	2030	788,2	645,6	135,8	509,8
			2050	799,2	653,5	147,2	506,3
	2	ACTUAL		795,0	644,7	188,0	456,7
		MPIECHAM 5	2030	820,7	664,5	171,0	493,5
			2050	832,1	674,0	181,4	492,6
		HADGEM 1	2030	820,7	664,5	151,9	512,6
			2050	832,1	674,0	150,6	523,4
		GFDL CM 2.0	2030	820,7	664,5	178,9	485,6
			2050	832,1	674,0	194,1	479,9
	3	ACTUAL		762,2	626,0	174,3	451,7
		MPIECHAM 5	2030	787,3	645,3	155,8	489,5
			2050	798,2	653,8	164,2	489,6
		HADGEM 1	2030	766,6	645,3	138,2	507,1
			2050	798,2	653,8	135,9	517,9
		GFDL CM 2.0	2030	787,3	645,3	168,7	476,6
			2050	797,9	653,7	184,9	468,8

Cuadro 12. Porcentajes de incremento o decremento de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Sorgo bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro.

Regiones		Modelos (MCG)	Años	ET_o (%)	ET_{caj} (%)	PPE (%)	R.R (%)
C A R B O N Í F E R A	1	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	3	3	-10	13
			2050	5	4	-5	11
		HADGEM 1	2030	3	3	-21	21
			2050	5	4	-23	24
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-4	8
			2050	0	4	4	4
	2	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	3	3	-10	10
			2050	5	4	-5	10
		HADGEM 1	2030	3	3	-22	17
			2050	5	4	-25	21
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-2	6
			2050	5	4	8	3
C E N T R O	1	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	3	3	-10	10
			2050	5	5	-4	7
		HADGEM 1	2030	3	3	-20	10
			2050	5	5	-20	12
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-7	6
			2050	5	5	1	6
	2	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	3	3	-9	8
			2050	5	5	-4	8
		HADGEM 1	2030	3	3	-19	12
			2050	5	5	-20	15
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-5	6
			2050	5	5	3	5
	3	ACTUAL		0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	3	3	-11	8
			2050	5	4	-6	8
		HADGEM 1	2030	1	3	-21	12
			2050	5	4	-22	15
		GFDL CM 2.0	2030	3	3	-3	6
			2050	5	4	6	4

Para el caso de trigo, en las regiones Carbonífera y Centro las estimaciones actuales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) oscila entre 503,8 y 516,9 mm, la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}) oscila entre 414,3 y 435,1 mm, la precipitación efectiva (PPE) entre 44,5 y 76,0 mm; esto debido a que en la época de invierno las lluvias son escasas. El requerimiento de riego (R.R) oscila entre 352,6 y 382,1 mm (Cuadro 13). A partir de las diferencias de temperatura pronosticados por los MCG (Cuadro 3), las estimaciones de ET_o y ET_{caj} se incrementaran entre un 2% a 6% para los años 2030 y 2050 en las dos regiones (Cuadro 14).

En los tres modelos pronostican que la precipitación efectiva será favorable para los años 2030 y 2050 (Cuadro 14). El modelo MPIECHAM 5 pronostica que en las regiones Carbonífera y Centro la PPE disminuirá hasta un 3% en 2030 y para el 2050 incrementara entre 4% y 10%, en la región Carbonífera no son significativas. El modelo GFDL CM 2.0, pronostica que en las dos regiones la PPE en 2030 son mínimas con respecto al actual, para el 2050 la PPE aumentara entre un 5% y 11%, predominando mayor incremento en la región Centro (Cuadro 14). Las mayores PPE son pronosticadas por el modelo HADGEM 1, en las dos regiones habrá incremento en 2030 entre un 7% a 10%, pero para el 2050 será de un 19% al 22%.

Los modelos MPIECHAM 5 y GFDL CM 2.0, pronostican que los requerimientos de riego aumentaran de un 2% al 7% para los años 2030 y 2050 en las regiones Carbonífera y Centro (Cuadro 14). El modelo HADGEM 1 pronostica que los requerimientos de riego en las dos regiones en 2030 y 2050 no son significativos.

Cuadro 13. Valores Totales de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Trigo bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro.

Regiones		Modelos (MCG)	Años	ET_o (mm)	ET_{caj} (mm)	PPE (mm)	R.R (mm)
C A R B O N Í F E R A	1	ACTUAL		513,5	428,6	76,0	352,6
		MPIECHAM 5	2030	523,0	436,9	73,4	363,5
			2050	529,8	441,3	76,6	364,7
		HADGEM 1	2030	523,0	436,9	83,5	353,4
			2050	529,8	441,3	92,9	348,4
		GFDL CM 2.0	2030	523,0	437,0	75,2	361,8
			2050	529,8	441,3	79,5	361,8
	2	ACTUAL		516,9	435,1	67,0	368,1
		MPIECHAM 5	2030	542,6	460,0	64,8	395,2
			2050	533,4	448,1	67,8	380,3
		HADGEM 1	2030	544,5	462,5	73,5	389,0
			2050	533,4	448,1	81,8	366,3
		GFDL CM 2.0	2030	542,6	460,0	66,6	393,4
			2050	533,4	448,1	70,7	377,4
C E N T R O	1	ACTUAL		505,6	419,3	46,6	372,7
		MPIECHAM 5	2030	515,2	429,2	45,5	383,7
			2050	521,2	433,1	48,5	384,6
		HADGEM 1	2030	515,2	429,2	50,6	378,6
			2050	525,7	433,7	56,6	377,1
		GFDL CM 2.0	2030	515,2	429,2	47,0	382,2
			2050	521,9	433,2	50,8	382,4
	2	ACTUAL		503,8	414,3	52,5	361,8
		MPIECHAM 5	2030	558,9	423,3	52,7	367,2
			2050	520,0	426,7	56,8	369,9
		HADGEM 1	2030	513,5	423,3	56,1	367,2
			2050	520,0	426,7	62,3	364,4
		GFDL CM 2.0	2030	513,5	423,3	53,7	369,6
			2050	520,0	426,7	58,3	368,4
	3	ACTUAL		505,6	426,6	44,5	382,1
		MPIECHAM 5	2030	514,8	434,7	44,8	389,9
			2050	523,4	439,0	48,9	390,1
		HADGEM 1	2030	514,8	434,7	47,7	387,0
			2050	521,6	439,0	53,5	385,5
		GFDL CM 2.0	2030	514,8	434,7	45,1	389,6
			2050	521,6	439,0	49,4	389,6

Cuadro 14. Porcentajes de incremento o decremento de evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), precipitación efectiva (PPE) y requerimiento de riego (R.R) en Trigo bajo el escenario de emisiones A1B, para los tres MCG, para los años 2030 y 2050 de Cambio Climático en las Regiones Carbonífera y Centro.

Regiones	Modelos (MCG)	Años	ET_o (%)	ET_{caj} (%)	PPE (%)	R.R (%)
C A R B O N Í F E R A	1	ACTUAL	0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	2	-3	3
			2050	3	1	3
		HADGEM 1	2030	2	10	0
			2050	3	22	-1
		GFDL CM 2.0	2030	2	-1	3
			2050	3	5	3
	2	ACTUAL	0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	5	-3	7
			2050	3	1	3
		HADGEM 1	2030	5	10	6
			2050	3	22	0
		GFDL CM 2.0	2030	5	-1	7
			2050	3	5	3
C E N T R O	1	ACTUAL	0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	2	-2	3
			2050	3	4	3
		HADGEM 1	2030	2	8	2
			2050	4	21	1
		GFDL CM 2.0	2030	2	1	3
			2050	3	9	3
	2	ACTUAL	0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	11	0	2
			2050	3	8	2
		HADGEM 1	2030	2	7	2
			2050	3	19	1
		GFDL CM 2.0	2030	2	2	2
			2050	3	11	2
	3	ACTUAL	0	0	0	0
		MPIECHAM 5	2030	2	1	2
			2050	4	10	2
		HADGEM 1	2030	2	7	1
			2050	3	20	1
		GFDL CM 2.0	2030	2	2	2
			2050	3	11	2

CONCLUSIONES

De acuerdo con los cambios pronosticados por los modelos de circulación general, el efecto del cambio climático tendrá mayor influencia en la precipitación efectiva que en la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) y en la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{caj}), siendo esta variable climática que más influirá en aumentar los requerimientos de riego de los cultivos de verano con respecto a los valores actuales, al reducirse las precipitaciones, incremento en requerimientos de riego de hasta 27% son pronosticados. En el caso del cultivo de invierno la precipitación efectiva aumentará y los incrementos de requerimientos de riego serán pequeños en relación a los valores actuales, incrementos de hasta de 7% son predecidas. Utilizando el modelo GFDL CM 2.0 se pronostica menores incrementos en los requerimientos de riego en los cultivos de verano e invierno con respecto al valor actual. Utilizando el modelo HADGEM 1 el comportamiento es contrario, mayores incrementos de requerimientos de riego en cultivo de verano y menor en el cultivo de invierno.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo la finalidad de estimar los requerimientos hídricos y de riego de maíz, frijol, sorgo y trigo para las regiones Centro y Carbonífera del Estado de Coahuila bajo escenario de cambio climático. La metodología que se empleó para estimar los requerimientos hídricos y de riego en los cultivos anteriormente mencionados en las regiones Centro y Carbonífera fue a partir de la recopilación de información climática correspondiente al periodo 1971-2000 de las estaciones meteorológicas, información agrícola y también se descargaron las diferencias climáticas de temperatura y precipitación utilizando el programa Surfer 8.0, elaborados por el Grupo de Cambio Climático de las Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. En base a la información obtenida de datos históricos (normales históricos) y los datos de los escenarios climáticos, se calcularon los valores de temperatura y precipitación para los tres MCG; para los escenarios 2030 y 2050. Las dos regiones fueron agrupadas de acuerdo a las estaciones climatológicas que tenían características similares en altitud con pocas diferencias en latitud y longitud. El modelo de simulación CropWat 8.0 de la FAO Penman-Monteith se utilizó para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos de los datos históricos y para datos con los cambios debido al escenario A1B de cambio climático propuestos en las dos regiones consideradas. La precipitación efectiva es la variable climática que más influirá en aumentar los requerimientos de riego de los cultivos de verano con respecto a los valores actuales, al reducirse las precipitaciones, incremento en requerimientos de riego de hasta 27% son pronosticados. En el caso del cultivo de invierno la precipitación efectiva aumentará y los incrementos de requerimiento de riego serán pequeños en relación a los valores actuales, reducciones de hasta de 7% son predecidas.

Palabras clave: Requerimientos hídricos, cambio climático, maíz, frijol, requerimientos de riego, sorgo, trigo, Coahuila.

LITERATURA CITADA

- Allen R. G; Pereira, D. Raes D; Smith M 1977. Crop water requirements. FAO Serie de Riego y Drenaje 24, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 2006.
- Allen R. G; Pereira L S; Raes D; Smith M (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome, Italy 300 pp.
- Allen, R. G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Serie de Riego y Drenaje, FAO-56. Roma. 301p
- Baldocchi, D. D., S. B. Verma, N. J. Rosenberg, B. L. Blad, A. Garay, and J. E. Specht. 1983. Influence of water stress on the diurnal exchange of mass and energy between the atmosphere and a soybean canopy. Agron. J. 75: 543-548.
- Boote K.J, J.W. Jones and N.B. Pickering. 1996. Potential uses and limitations of crop models. Agr. J. 98:704-716.
- Cooperative Extension Service: Universidad de Florida. Drought advisory for vegetable production (en línea). Disponible en: Drought Advisory.htm consulta 2001a.
- Craddock, E. 1990. "The California Irrigation management Information System (CIMIS). Management of farm Irrigation System, edited by Hoffman, G. J. Howell, T. A., and Solomon, K. H. American Society of Agricultural Engineers. 1040 pp.
- Carlson, J. D., Derek, S., Greenfielf, J., Usman, A. 1998. Development of Near- Real-Time, Web- Based Management Tools for Agriculture Resources Using the Oklanhoma Mesonet. 23rd Conference on Agriculture and Forest Meteorological, edited by Strand, J. F. and Goens, D. American Meteorological Society. Vol. 1: 254-261.
- Caviglia y colab. 1999. Maíz en SD. Jornadas de intercambio técnico de maíz. Agua, pág. 19-33.
- Coras M., P. M. (2004), "Probabilidad de lluvias máximas, con fines de drenaje superficial. Edo. De Tabasco", Memorias 1er Congreso Nacional de Fenología

Agrícola Modelos de Simulación Aplicados a la Agricultura, 26 al 28 de mayo, Chapingo, México[CD-ROM].

Contreras, M. 2004. Algunos indicadores de productividad en el cultivo de maíz bajo riego. www.agr.unne.edu.ar

Conde, C., B. Martínez, O. Sánchez, F. Estrada, A. Fernández, J. Zavala, C. Gay. 2008. Escenarios de Cambio Climático (2030 y 2050) para México y Centro América. Temperatura y Precipitación. [Documento en línea]. Disponible desde internet en http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74

De Fina, A. L. y C. Ravelo (1973), Climatología y fenología agrícola, Ed. Universitaria de Buenos Aires, Argentina.

Doorenbos, J. y W.O. Pruitt. 1975. Guidelines for prediction of crop water requirements. Serie de Riego y Drenaje, FAO-24. Roma 144p.

Doorenbos, J. y W.O. Pruitt (1977).- Las necesidades de agua de los cultivos. Riego y Drenaje, 24. FAO. 125 pp. (Este trabajo ha sido actualizado por la FAO mediante el de Allen et al. 1998)

Doorenbos J; Pruitt W O (1977). Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome, Italy 144p.

Delegido, J.; Caselles, V.; Hurtado, E. (1991): "Determinación a escala regional de la evapotranspiración". En S. Gandía, J. Meliá (Eds.), La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: Agricultura. Curso de Postgrado, Universitat de Valencia. Estudi General. Departament de Termodinámica. Unidad de Investigación de Teledetección.

Della Maggiora, A.I., Gardiol, J.M. e Irigoyen, A.I. 2000 Requerimientos hídricos. In F. Andrade – V. Sadras Ed: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja (cap. 6): 155-1

Engel, T.; Hoogenboom, G.; Jones, J. W. y Wilkens, P. W. AEGIS/WIN, a computer program for the application of crop simulation models across geographic areas. Agronomy Journal, 1997, no. 89, p. 919-928.

FAO, USDA, OIMA (Sistemas de Información de Mercados de América), Rice Market News, Corporación Arrocera, Banco Central, Ministerios y Secretarías de Agricultura, Periódicos Latinoamericanos.

Fernández García, F. (1995): Manual de Climatología Aplicada. Editorial Sintesis. Madrid. 285 pp.

For further reference see FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998. *Crop Evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements*.

GAY, C. et al. (Eds.) (1995). Memorias del Primer Taller del Estudio del País: México ante el Cambio Climático. INE, CCA, UNAM, USCSP. Cuernavaca, Mor., 1994.

GAY, C. et al. (Eds.) (1996). Memorias del Segundo Taller del Estudio del País México ante el Cambio Climático. INE, CCA, UNAM, USCSP. Cuernavaca, Mor., 1995.

Gay-García, C. and L.G. Ruiz Suarez, 1996: UNEPPreliminary Inventory of GHG Emissions: Mexico. UNEP, Geneva, Switzerland.

Gay, C., F. Estrada, C. Conde and H. Eakin. 2004 Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, México. Agricultural Economics.

Izmailova, A.V. and A.I. Moiseenkov, 1998: Proceeding of the Second International Conference on Climate and Water, Espoo, Finland, 17–20August 1998, Vol 3.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Special report on Emissions Scenarios. N. Navicenovic (Ed), Cambridge University Press.

Jones, J. W.; Tsuji, G. Y.; Hoogenboom, G.; Hunt, L. A.; Thornton, P. K.; Wilkens, P. W.; Imamura, D. T.; Bowen, W. T. y Singh, U. Decision support system for agrotechnology transfer:DSSAT, 1998, vol. 3, p. 157-177.

Kustas, W. P. y Norman, J. M. (1996): “Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces”. Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 41, pp. 495-516.

Leal Medellín Fernando, (Ed.). 1978. La Desertificación de México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México. p (107)

López, P.F. y López, H. C. 1992. “Servicio de Asesoramiento de Riego”. Agronomía del Riego editado por Martín de Santa Olalla, F. y de Juan Valero, J. A. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología. Universidad de Castilla-La Mancha. Ediciones Mundiprensa, Madrid.

Liu Y; Teixeira J L; Zhang H J; Pereira L S (1998). Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. Agricultural Water Management, 36: 233–246.

- McKenney, M. y Rosenberg, N. J. (1993): "Sensitivity of some potencial evapotranspiration estimation methods to climate change". *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 64, pp. 81-110.
- Mendelshon, R. 2000. Efficient adaptation to climate change. *Climate Change*, 45 (3-4): 583-600.
- Ortega- Farias, S., Rigetti, T., Sasso, F., Acevedo, C., Matus, F. and Moreno, Y. 2003. Site-specific management of irrigation water in grapevines. IX Latin American Congress on Viticulture and Enology; Symposium on Precision Viticulture 55-71. Pontificia Universidad de Catolica de Chile, Santiago.
- Pereira L S; Teodoro P R; Rodrigues P N; Teixeira J L (2003). Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions (Rossi G; Cancelliere A; Pereira L S; Oweis T; Shatanawi M; Zairi A, eds) pp 161 – 180. Kluwer, Dordrecht.
- Romo, G. J. y Arteaga, R. R. (1989). *Meteorología Agrícola*. Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Irrigación. México. 442 páginas.
- Rosenzweig, C.; Strzepek, K.; Major, D.; Iglesias, A.; Yates, D.; McCluskey, A.; Hiller, D. 2004. Water resources for agriculture in a changing climate: international case studies. *Global Environmental Change*, 14 (4), pp. 345-360.
- Snyder R., Pruitt, W. O. and Dong, A. 1984. "An Automatic Weather Station Network for Estimation of Evapotranspiration". International Comission of Irrigation and drainage. Paris.
- Snyder R. and Pruitt, W.O. 1985. "Estimating Reference Evapotranspiration with hourly data". VII-1-VII-3. In Snyder, R, Henderson, D. W., Pruitt, W. O., and Dong. A. (Eds). Calif. Irrig. Mngmt. Info. System Final rep., Univ. Calif., Davis.
- Sickler G. and Dogget, A. 1998. The Texas Mesonet-Concept to Reality. 23rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology, edited by Strand, J.F. and Goens, D. American Meteorological Society. Vol. 1:243-246
- Semenov, M. A. And P. D. Jamieson. 2000. Using weather generators in crop modeling. In Sivakumar, M. K. (Ed.). *Climate Prediction and Agriculture*, Proocedings of the START/WMO. International Worwshop held in Geneva, Switzerland, 27,29 September 1999, Washington D. C. USA, International, Start Secretariat. P 119-142.
- Soto, O.; Galvéz, G. y Sigarroa, A. Estudio y modelación de algunas variables que influyen en el rendimiento agrícola de la caña de azúcar. Evento ATAC. 2004.

- Seo, N.; Mendelsohn, R. 2007a. An analysis of crop choice: adapting to climate change in Latin American faros. Washington D.C., Banco Mundial (Policy Research Working Paper No. 4162)
- Texeira J L; Pereira L S (1992). ISAREG: an irrigation scheduling simulation model. In: Crop Water Models (Pereira L S; Perrier A; Ait Kadi M; Kabat P, eds): Special issue of ICID Bulletin, Vol. 41(2), pp. 29 – 48.
- Thornton, P. K. y Hoogenboom, G. A computer program to analyze single season crop model outputs. *Agronomy Journal*, 1994, no. 86, p. 860-868.
- Thornton, P. K.; Hoogenboom, G.; Wilkens, P. W. y Bowen, W. T. A computer program to analyze multiple season crop model outputs. *Agronomy Journal*, 1995, no. 87, p. 131-136.
- Thornton, P. K.; Booltink, H. W. G. y Stoorvogel, J. J. A computer program for geostatistical and spatial analysis of crop model output. *Agronomy Journal*, 1997, no. 89, p. 620-627
- Trezza, R. 2008. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar?. *Bioagro*. 20(2): pp. 89-95. Venezuela
- Utset, A y A. Martínez-Cobos. 2003. estimación del posible efecto del cambio climático en el balance hídrico del maíz cultivado en una llanura mediterránea. Estudios de la zona no saturada del suelo. Vol VI. Edit. Alvarez Benedí y P Marinero. Pp 305-311.
- Villers-Ruiz, L. and I. Trejo-Vázquez, 1998: Climate change on Mexican forests and natural protected areas. *Global Environmental Change*, 8(2), 141–157.
- Villalobos, R., y J. Retana. 1999. Efecto del cambio climático en la agricultura, experiencias en Costa Rica. XI Congreso Nacional Agronómico. P 367-369.
- Wilby, R. L. and T. M. L. Wigley. 2000. Down – scaling general circulation issues in climate prediction: In Sivakumar, M. K. (Ed.). *Climate Prediction and Agriculture*, Proceedings of the START/WMO. International Workshop held in Geneva, Switzerland, 27,29 September 1999, Washington D. C. USA, International, Start Secretariat. Pp 39-68.
- White, J. W. y Hoogenboom, G. Gene-based approaches to crop simulation: Past experience and future opportunities. *Agronomy Journal*, 2003, no. 95, p. 52-64

DIRECCION DE CONSULTA EN INTERNET

Wikipedia (2005), www.eueommexico.org/States/Coahuila.pdf

SFE (2006), <http://www.investcoahuila.com/.../regions/CARBONIFERA-Nov2006.doc>

SFE (2006), <http://www.investcoahuila.com/.../regions/CENTRODESIERTO-Nov2006.doc>

FESEC (2007), <http://www.fesec.com.mx/ingles/images/location/mapa-mexico.jpg>

UNAM (2008), http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74

FAO (2010), http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos de temperatura máxima, mínima y precipitación en estaciones climatológicas de las regiones Carbonífera y Centro del Estado de Coahuila (1971-2000)

Estaciones	Enero			Febrero			Marzo			Abril		
	T. Max	T.Min	PP	T. Max	T. Min	PP	T. Max	T. Min	PP	T. Max	T. Min	PP
Múzquiz	19,3	3,4	22,1	21,2	4,7	18,6	25,5	7,9	13,1	28,3	11,0	39,8
Palahu Múzquiz	21,7	7,0	18,5	24,5	8,6	15,9	28,2	10,8	16,4	31,3	12,8	30,1
Las Esperanzas, Múzquiz	19,3	6,5	17,9	20,9	8,5	18,4	24,9	11,8	18,1	28,9	15,7	39,1
Sabinas	20,1	4,6	12,6	23,1	6,9	13,2	27,9	11,0	17,1	31,1	14,8	30,9
Conchos San Juan Sabinas	18,4	3,8	20,4	22,5	4,6	15,6	27,6	9,5	7,2	30,8	12,0	40,9
Progreso	20,1	4,4	16,3	22,3	6,3	20,1	27,5	9,9	11,4	30,7	14,2	27,5
Abasolo y Escobedo	19,1	4,0	7,4	21,5	5,8	10,0	25,5	8,4	12,0	28,4	11,1	25,5
Rodríguez Escobedo	19,9	4,0	11,6	21,7	5,3	8,4	25,6	7,8	4,9	29,8	11,9	15,3
Sacramento y Nadadores	19,7	5,2	18,5	19,8	5,4	6,9	23,9	7,5	8,5	27,2	8,6	20,4
Monclova	17,9	5,4	13,3	21,5	7,2	10,9	28,4	12,7	3,8	30,5	16,3	23,7
Candela	13,0	6,8	15,7	15,7	9,0	10,9	22,4	15,4	7,1	27,9	20,3	29,2
La Madrid	23,0	5,8	24,4	25,0	6,7	10,8	29,0	8,7	8,7	31,7	11,7	17,0
El gato Ndrs. y San B. ventura	19,5	3,7	18,2	21,5	5,5	9,8	25,1	8,9	8,8	28,4	12,8	16,0
Castaños	18,6	3,9	11,9	21,1	4,8	9,4	24,7	8,6	7,4	27,9	10,6	30,2
El Márquez Castaños	20,9	1,5	17,3	23,0	2,8	6,7	27,4	6,2	5,7	30,8	10,3	18,1
Bajan Castaños	19,1	3,5	12,2	22,0	4,9	3,9	25,6	7,7	4,8	29,8	11,5	12,4
El Taquito Castaños	17,8	2,8	21,5	20,2	4,4	5,3	24,6	6,7	3,4	28,3	10,0	17,4
Santa Teresa Castaños	19,9	4,2	27,1	22,2	6,6	4,8	25,9	9,2	4,1	28,7	12,4	17,0

Fuente: Guillermo Crespo Pichardo (crespogg@yahoo.com).

Apéndice 1. Continuación...

Estaciones	Mayo			Junio			Julio			Agosto		
	T. Max	T. Min	PP	T. Max	T. Min	PP	T. Max	T. Min	PP	T. Max	T. Min	PP
Múzquiz	30,7	15,9	72,5	33,0	18,6	98,7	33,1	18,8	88,2	32,7	18,8	80,8
Palahu Múzquiz	33,8	15,9	79,3	35,8	20,6	50,8	36,5	22,2	61,9	36,6	22,7	55,6
Las Esperanzas, Múzquiz	32,3	20,8	73,4	34,9	23,2	67,7	34,9	23,5	57,6	35,8	23,4	51,6
Sabinas	33,9	20,0	80,4	35,5	22,1	72,7	36,4	23,0	55,6	36,2	22,8	49,4
Conchos San Juan Sabinas	33,3	16,1	51,9	34,7	20,0	92,2	34,9	20,3	75,7	35,3	19,9	45,7
Progreso	33,5	18,5	48,0	35,7	21,0	76,3	36,5	21,5	40,9	35,9	20,8	41,4
Abasolo y Escobedo	30,5	16,6	55,3	33,4	18,8	24,8	33,3	19,5	19,4	32,4	19,2	28,2
Rodríguez Escobedo	32,1	18,1	41,6	34,2	21,0	31,7	35,3	21,4	22,1	34,7	21,4	33,9
Sacramento y Nadadores	30,0	9,8	34,1	32,0	9,9	33,3	32,9	10,3	49,8	32,8	10,9	48,2
Monclova	34,2	20,1	29,0	35,2	21,9	58,4	35,2	22,0	63,6	35,0	21,4	54,5
Candela	32,4	23,6	40,4	34,4	25,4	49,2	35,9	26,1	60,4	35,5	26,0	57,0
La Madrid	35,1	13,8	39,7	36,9	16,2	36,4	36,6	17,9	55,7	36,7	16,2	47,2
El gato Ndrs. y San B. ventura	32,5	17,5	44,4	34,8	20,0	45,7	34,4	20,4	37,2	33,5	20,2	53,0
Castaños	33,9	15,1	64,8	35,2	17,5	63,0	35,2	17,1	58,6	35,0	17,0	58,7
El Márquez Castaños	34,2	14,9	35,4	34,9	17,9	58,6	34,7	18,1	56,2	34,1	17,6	45,4
Bajan Castaños	33,3	16,1	33,7	34,9	18,8	29,8	35,2	18,9	35,0	34,4	18,4	52,7
El Taquito Castaños	31,1	14,2	28,5	32,3	16,9	39,6	31,9	16,9	46,6	31,0	16,5	34,9
Santa Teresa Castaños	32,2	16,6	35,3	33,3	17,6	34,5	33,1	18,1	52,4	32,2	18,5	53,4

Fuente: Guillermo Crespo Pichardo (crespogp@yahoo.com).

Apéndice 1. Continuación...

Estaciones	Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
	T. Max	T. Min	PP	T. Max	T. Min	PP	T. Max	T. Min	PP	T. Max	T. Min	PP
Múzquiz	30,5	16,5	105,6	26,6	11,6	50,4	22,8	6,6	27,3	18,9	3,6	12,0
Palahu Múzquiz	33,4	19,7	78,0	31,4	15,3	36,6	27,0	11,5	14,0	22,6	8,3	15,3
Las Esperanzas, Múzquiz	33,2	20,7	72,7	29,5	17,0	36,3	24,2	11,4	16,6	20,6	7,7	17,2
Sabinas	33,6	20,4	80,5	29,3	15,9	46,2	24,4	9,9	18,5	20,2	5,8	11,1
Conchos San Juan Sabinas	33,0	18,7	65,0	28,5	13,2	53,0	22,9	7,7	24,8	18,5	4,8	14,7
Progreso	33,3	18,7	71,4	29,0	13,8	40,9	24,2	8,2	14,7	20,5	5,5	16,5
Abasolo y Escobedo	31,5	16,3	15,8	26,9	11,2	27,6	22,2	7,7	14,3	20,0	4,6	5,8
Rodríguez Escobedo	31,4	18,6	54,9	27,2	12,4	21,1	23,9	7,4	5,7	20,0	4,6	10,2
Sacramento y Nadadores	30,3	10,8	56,0	27,3	9,8	29,1	24,4	8,3	9,1	23,0	8,0	18,7
Monclova	31,7	19,9	74,0	27,3	15,6	43,9	24,7	10,5	16,7	21,1	7,5	19,5
Candela	31,5	22,3	67,4	26,5	19,4	38,6	20,8	14,6	15,9	16,0	9,8	11,9
La Madrid	34,4	14,5	65,3	31,4	11,3	30,7	28,1	7,8	12,8	23,0	5,4	14,1
El gato Ndrs. y San B. ventura	30,3	18,0	73,8	26,7	13,5	34,5	23,3	8,6	16,1	20,2	5,1	13,3
Castaños	32,2	15,3	64,3	27,6	11,7	24,7	22,5	7,3	7,5	17,0	3,1	12,6
El Márquez Castaños	32,2	15,3	55,1	29,2	10,8	30,7	24,8	5,1	8,1	20,4	1,3	12,3
Bajan Castaños	32,0	16,7	49,1	29,1	12,4	26,8	24,4	8,2	12,5	20,3	4,1	11,4
El Taquito Castaños	28,6	14,6	46,7	26,1	11,2	23,3	22,4	6,3	5,6	18,8	3,8	9,7
Santa Teresa Castaños	29,3	16,9	61,9	27,3	13,7	34,3	24,9	11,2	11,7	21,8	6,8	18,0
PARAMETRO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humedad relativa (%)	55	58	53	52	54	63	67	67	76	72	61	60
Radiación solar (horas)	8	8	8	9	10	9	9	9	7	8	8	7
Velocidad del viento (km/día)	258	302	334	338	342	324	302	269	257	261	296	288

Fuente: Guillermo Crespo Pichardo (crespogp@yahoo.com).

Apéndice 2. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) de los datos históricos (actuales) en mm/día.

Estaciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom.
Múzquiz	3,04	3,64	4,99	6,01	6,85	6,49	6,19	5,86	4,46	3,89	3,53	2,88	4,82
Palahu Múzquiz	3,32	4,06	5,44	6,55	7,28	6,92	6,71	6,47	4,82	4,45	4,10	3,29	5,29
Las Esperanzas, Múzquiz	3,07	3,62	4,93	6,15	7,12	6,86	6,52	6,37	4,80	4,25	3,81	3,08	5,05
Sabinas	3,13	3,86	5,36	6,50	7,38	6,93	6,72	6,42	4,85	4,23	3,81	3,03	5,18
Conchos San Juan Sabinas	2,95	3,78	5,31	6,45	7,20	6,77	6,47	6,23	4,77	4,15	3,62	2,84	5,04
Progreso	3,14	3,76	5,29	6,43	7,27	6,94	6,73	6,35	4,81	4,20	3,76	3,05	5,14
Abasolo y Escobedo	3,03	3,67	5,00	6,02	6,72	6,55	6,23	5,83	4,59	3,93	3,50	2,99	4,84
Rodríguez Escobedo	3,11	3,71	5,0	6,24	7,13	6,70	6,54	6,20	4,60	3,97	3,66	3,00	4,99
Sacramento y Nadadores	3,15	3,49	4,76	5,84	6,61	6,36	6,19	5,87	4,44	3,93	3,71	3,32	4,81
Monclova	2,98	3,67	5,45	6,45	7,43	6,89	6,54	6,24	4,66	4,03	3,86	3,19	5,12
Candela	2,61	3,11	4,70	6,18	7,27	6,85	6,72	6,45	4,69	4,04	3,57	2,78	4,91
La Madrid	3,45	4,14	5,55	6,60	7,53	7,14	6,74	6,46	4,98	4,49	4,26	3,33	5,39
El gato Ndrs. y San B. ventura	3,07	3,67	4,92	6,02	7,06	6,79	6,41	6,01	4,46	3,91	3,64	3,02	4,91
Castaños	3,00	3,66	4,90	5,93	7,26	6,84	6,51	6,20	4,72	4,07	3,62	2,73	4,95
El Márquez Castaños	3,27	3,92	5,30	6,42	7,33	6,79	6,44	6,07	4,71	4,28	3,92	3,11	5,13
Bajan Castaños	3,08	3,78	5,01	6,24	7,17	6,78	6,51	6,12	4,68	4,24	3,84	3,09	5,04
El Taquito Castaños	2,94	3,55	4,87	6,00	6,78	6,36	6,01	5,64	4,26	3,87	3,58	2,92	4,73
Santa Teresa Castaños	3,18	3,80	5,08	6,08	7,11	6,54	6,19	5,82	4,35	3,98	3,79	3,26	4,93

Apéndice 3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el año 2030 modelo MPIECHAM 5 escenario A1B en mm/día.

Estaciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom.
Múzquiz	3,03	3,82	5,08	6,10	7,26	6,70	6,31	6,06	4,67	3,93	3,59	2,91	4,96
Palahu Múzquiz	3,30	4,25	5,53	6,65	7,69	7,14	6,84	6,68	5,03	4,50	4,17	3,33	5,42
Las Esperanzas, Múzquiz	3,06	3,80	5,02	6,25	7,53	7,08	6,64	6,57	5,01	4,30	3,87	3,12	5,19
Sabinas	3,11	4,04	5,45	6,60	7,79	7,15	6,85	6,63	5,07	4,28	3,87	3,07	5,32
Conchos San Juan Sabinas	2,93	3,97	5,40	6,55	7,61	6,98	6,59	6,44	4,98	4,19	3,67	2,88	5,18
Progreso	3,12	3,89	6,98	6,60	7,69	7,15	6,86	6,56	5,02	4,24	3,82	3,09	5,42
Abasolo y Escobedo	3,01	3,86	5,09	6,12	7,13	6,76	6,35	6,03	4,80	3,97	3,56	3,03	4,98
Rodríguez Escobedo	3,10	3,89	5,09	6,34	7,54	6,91	6,66	6,40	4,81	4,01	3,72	3,03	5,13
Sacramento y Nadadores	3,13	3,67	4,85	5,94	7,01	6,56	6,31	6,06	4,64	3,97	3,77	3,36	4,94
Monclova	2,97	3,86	5,54	6,54	7,83	7,10	6,67	6,44	4,87	4,07	3,92	3,23	5,25
Candela	2,59	3,29	4,79	6,28	7,67	7,06	6,85	6,66	4,91	4,09	3,63	2,82	5,05
La Madrid	3,43	4,33	5,65	6,70	7,94	7,35	6,86	6,66	5,19	4,53	4,33	3,37	5,53
El gato Ndrs. y San B. ventura	3,06	3,86	5,01	6,11	7,46	7,00	6,53	6,21	4,66	3,95	3,70	3,06	5,05
Castaños	2,99	3,85	4,99	6,02	7,66	7,05	6,64	6,40	4,92	4,11	3,68	2,76	5,09
El Márquez Castaños	3,25	4,11	5,39	6,51	7,73	6,99	6,56	6,27	4,92	4,32	3,98	3,15	5,26
Bajan Castaños	3,06	3,96	5,10	6,33	7,57	6,99	6,63	6,32	4,88	4,29	3,89	3,13	5,18
El Taquito Castaños	2,93	3,73	4,95	6,09	7,18	6,57	6,13	5,83	4,46	3,91	3,64	2,95	4,86
Santa Teresa Castaños	3,16	3,98	5,16	6,17	7,51	6,74	6,31	6,01	4,55	4,02	3,85	3,30	5,06

Apéndice 4. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el año 2050 modelo MPIECHAM 5 escenario A1B en mm/día.

Estaciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom.
Múzquiz	3,03	3,91	5,10	6,29	7,45	6,75	6,38	6,17	4,75	3,99	3,66	2,97	5,04
Palahu Múzquiz	3,30	4,34	5,55	6,83	7,88	7,19	6,91	6,79	5,11	4,56	4,24	3,40	5,51
Las Esperanzas, Múzquiz	3,06	3,89	5,04	6,43	7,72	7,14	6,72	6,68	5,09	4,36	3,94	3,18	5,27
Sabinas	3,11	4,13	5,48	6,79	7,98	7,21	6,93	6,74	5,15	4,34	3,94	3,13	5,41
Conchos San Juan Sabinas	2,93	4,05	5,43	6,74	7,80	7,04	6,67	6,54	5,06	4,25	3,75	2,94	5,27
Progreso	3,12	4,04	5,41	6,72	7,87	7,21	6,93	6,67	5,11	4,30	3,90	3,15	5,37
Abasolo y Escobedo	3,01	3,95	5,12	6,31	7,31	6,82	6,43	6,14	4,87	4,03	3,63	3,09	5,06
Rodríguez Escobedo	3,1	3,98	5,11	6,52	7,73	6,97	6,74	6,51	4,89	4,07	3,79	3,10	5,21
Sacramento y Nadadores	3,13	3,76	4,87	6,12	7,19	6,62	6,38	6,17	4,72	4,02	3,84	3,42	5,02
Monclova	2,96	3,94	5,57	6,73	8,02	7,16	6,74	6,55	4,95	4,13	3,99	3,29	5,34
Candela	2,59	3,37	4,81	6,46	7,86	7,12	6,92	6,77	4,99	4,15	3,70	2,88	5,14
La Madrid	4,43	4,42	5,67	6,88	8,12	7,41	6,94	6,77	5,26	4,59	4,40	3,43	5,61
El gato Ndrs. y San B. ventura	3,06	3,94	5,04	6,29	7,64	7,06	6,61	6,32	4,74	4,00	3,77	3,12	5,13
Castaños	2,99	3,93	5,01	6,20	7,84	7,11	6,71	6,50	5,00	4,17	3,75	2,82	5,17
El Márquez Castaños	3,25	4,20	5,42	6,69	7,91	7,05	6,63	6,37	4,99	4,38	4,05	3,21	5,35
Bajan Castaños	3,06	4,05	5,13	6,51	7,75	7,04	6,71	6,42	4,96	4,35	3,97	3,19	5,26
El Taquito Castaños	2,93	3,82	4,98	6,27	7,36	6,63	6,20	5,93	4,53	3,97	3,71	3,01	4,94
Santa Teresa Castaños	3,16	4,07	5,19	6,35	7,69	6,80	6,38	6,12	4,63	4,08	3,92	3,36	5,14

Apéndice 5. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el año 2030 modelo HADGEM 1 escenario A1B en mm/día.

Estaciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom.
Múzquiz	3,03	3,82	5,08	6,10	7,26	6,70	6,31	6,06	4,67	3,93	3,59	2,91	4,96
Palahu Múzquiz	3,30	4,25	5,53	6,65	7,69	7,14	6,84	6,68	5,03	4,50	4,17	3,33	5,42
Las Esperanzas, Múzquiz	3,06	3,80	5,02	6,25	7,53	7,08	6,64	6,57	5,01	4,30	3,87	3,12	5,19
Sabinas	3,11	4,04	5,45	6,60	7,79	7,15	6,85	6,63	5,07	4,28	3,87	3,07	5,32
Conchos San Juan Sabinas	2,93	3,97	5,40	6,55	7,61	6,98	6,59	6,44	4,98	4,19	3,67	2,88	5,18
Progreso	3,12	3,88	7,17	6,61	7,69	7,15	6,86	6,56	5,02	4,24	3,82	3,09	5,43
Abasolo y Escobedo	3,01	3,86	5,09	6,12	7,13	6,76	6,35	6,03	4,80	3,97	3,56	3,03	4,98
Rodríguez Escobedo	3,10	3,89	5,09	6,34	7,54	6,91	6,66	6,40	4,81	4,01	3,72	3,03	5,13
Sacramento y Nadadores	3,13	3,67	4,85	5,94	7,01	6,56	6,31	6,06	4,64	3,97	3,77	3,36	4,94
Monclova	2,97	3,86	5,54	6,54	7,83	7,10	6,67	6,44	4,87	4,07	3,92	3,23	5,25
Candela	2,59	3,29	4,79	6,28	7,67	7,06	6,85	6,66	4,91	4,09	3,63	2,82	5,05
La Madrid	3,43	4,33	5,65	6,70	7,94	7,35	6,86	6,66	5,19	4,53	4,33	3,37	5,53
El gato Ndrs. y San B. ventura	3,06	3,86	5,01	6,11	7,46	7,00	6,53	6,21	4,66	3,95	3,70	3,06	5,05
Castaños	2,99	3,85	4,99	6,02	7,66	7,05	6,64	6,40	4,92	4,11	3,68	2,76	5,09
El Márquez Castaños	3,25	4,11	5,39	6,51	7,73	6,99	6,56	6,27	4,92	4,32	3,98	3,15	5,26
Bajan Castaños	3,06	3,96	5,10	6,33	7,57	6,99	6,63	6,32	4,88	4,29	3,89	3,13	5,18
El Taquito Castaños	2,93	3,73	4,95	6,09	7,18	6,57	6,13	5,83	4,46	3,91	3,64	2,95	4,86
Santa Teresa Castaños	3,16	3,98	5,16	6,17	7,51	6,74	6,31	6,01	4,55	4,02	3,85	3,30	5,06

Apéndice 6. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el año 2050 modelo HADGEM 1 escenario A1B en mm/día.

Estaciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom.
Múzquiz	3,03	3,91	5,10	6,29	7,45	6,75	6,38	6,17	4,75	3,99	3,66	2,97	5,04
Palahu Múzquiz	3,30	4,34	5,55	6,83	7,88	7,19	6,91	6,79	5,11	4,56	4,24	3,40	5,51
Las Esperanzas, Múzquiz	3,06	3,89	5,04	6,43	7,72	7,14	6,72	6,68	5,09	4,36	3,94	3,18	5,27
Sabinas	3,11	4,13	5,48	6,79	7,98	7,21	6,93	6,74	5,14	4,46	3,95	3,13	5,42
Conchos San Juan Sabinas	2,93	4,05	5,43	6,74	7,80	7,04	6,67	6,54	5,06	4,25	3,75	2,94	5,27
Progreso	3,12	4,04	5,41	6,72	7,87	7,21	6,93	6,67	5,11	4,30	3,90	3,15	5,37
Abasolo y Escobedo	3,01	3,95	5,12	6,31	7,31	6,82	6,43	6,14	4,87	4,03	3,63	3,09	5,06
Rodríguez Escobedo	3,10	3,98	5,11	6,52	7,73	6,97	6,74	6,51	4,89	4,07	3,79	3,10	5,21
Sacramento y Nadadores	3,13	3,76	4,81	8,03	7,27	6,62	6,38	6,17	4,72	4,02	3,84	3,42	5,18
Monclova	2,96	3,94	5,57	6,73	8,02	7,16	6,74	6,55	4,95	4,13	3,99	3,29	5,34
Candela	2,59	3,37	4,81	6,46	7,86	7,12	6,92	6,77	4,99	4,15	3,70	2,88	5,14
La Madrid	3,43	4,42	5,67	6,88	8,12	7,41	6,94	6,77	5,26	4,59	4,4	3,43	5,61
El gato Ndrs. y San B. ventura	3,06	3,94	5,04	6,29	7,64	7,06	6,61	6,32	4,74	4,00	3,77	3,12	5,13
Castaños	2,99	3,93	5,01	6,20	7,84	7,11	6,71	6,50	5,00	4,17	3,75	2,82	5,17
El Márquez Castaños	3,25	4,20	5,42	6,69	7,91	7,05	6,63	6,37	4,99	4,38	4,05	3,21	5,35
Bajan Castaños	3,06	4,05	5,13	6,51	7,75	7,04	6,71	6,42	4,96	4,35	3,97	3,19	5,26
El Taquito Castaños	2,93	3,82	4,98	6,27	7,36	6,63	6,20	5,93	4,53	3,97	3,71	3,01	4,94
Santa Teresa Castaños	3,16	4,07	5,19	6,35	7,69	6,80	6,38	6,12	4,63	4,08	3,92	3,36	5,14

Apéndice 7. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el año 2030 modelo GFDL CM 2.0 escenario A1B en mm/día.

Estaciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom.
Múzquiz	3,03	3,82	5,08	6,10	7,15	6,70	6,31	6,06	4,67	3,93	3,65	2,91	4,95
Palahu Múzquiz	3,30	4,25	5,53	6,65	7,69	7,14	6,84	6,68	5,03	4,50	4,17	3,33	5,42
Las Esperanzas, Múzquiz	3,06	3,80	5,02	6,25	7,53	7,08	6,64	6,57	5,01	4,30	3,87	3,12	5,19
Sabinas	3,11	4,04	5,45	6,60	7,79	7,15	6,85	6,63	5,07	4,28	3,87	3,07	5,32
Conchos San Juan Sabinas	2,93	3,97	5,40	6,55	7,61	6,98	6,59	6,44	4,98	4,19	3,67	2,88	5,18
Progreso	3,12	3,89	6,98	6,60	7,69	7,15	6,86	6,56	5,02	4,24	3,82	3,09	5,42
Abasolo y Escobedo	3,01	3,86	5,09	6,12	7,13	6,76	6,35	6,03	4,80	3,97	3,56	3,03	4,98
Rodríguez Escobedo	3,10	3,89	5,09	6,34	7,42	6,91	6,66	6,40	4,81	4,01	3,78	3,03	5,12
Sacramento y Nadadores	3,13	3,67	4,85	5,94	7,01	6,56	6,31	6,06	4,64	3,97	3,77	3,36	4,94
Monclova	2,97	3,86	5,54	6,54	7,83	7,10	6,67	6,44	4,87	4,07	3,92	3,23	5,25
Candela	2,59	3,29	4,79	6,28	7,67	7,06	6,85	6,66	4,91	4,09	3,63	2,82	5,05
La Madrid	3,43	4,33	5,65	6,70	7,94	7,35	6,86	6,66	5,19	4,53	4,33	3,37	5,53
El gato Ndrs. y San B. ventura	3,06	3,86	5,01	6,11	7,46	7,00	6,53	6,21	4,66	3,95	3,70	3,06	5,05
Castaños	2,99	3,85	4,99	6,02	7,66	7,05	6,64	6,40	4,92	4,11	3,68	2,76	5,09
El Márquez Castaños	3,25	4,11	5,39	6,51	7,73	6,99	6,56	6,27	4,92	4,32	3,98	3,15	5,26
Bajan Castaños	3,06	3,96	5,10	6,33	7,57	6,99	6,63	6,32	4,88	4,29	3,89	3,13	5,18
El Taquito Castaños	2,93	3,73	4,95	6,09	7,18	6,57	6,13	5,83	4,46	3,91	3,64	2,95	4,86
Santa Teresa Castaños	3,16	3,98	5,16	6,17	7,51	6,74	6,31	6,01	4,55	4,02	3,85	3,30	5,06

Apéndice 8. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) para el año 2050 modelo GFDL CM 2.0 escenario A1B en mm/día.

Estaciones	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Prom.
Múzquiz	3,03	3,91	5,10	6,29	7,33	6,75	6,38	6,17	4,75	3,99	3,72	2,97	5,03
Palahu Múzquiz	3,30	4,34	5,55	6,83	7,88	7,19	6,91	6,79	5,11	4,56	4,24	3,40	5,51
Las Esperanzas, Múzquiz	3,06	3,89	5,04	6,43	7,72	7,14	6,72	6,68	5,09	4,36	3,94	3,18	5,27
Sabinas	3,11	4,13	5,48	6,79	7,98	7,21	6,93	6,74	5,15	4,34	3,94	3,13	5,41
Conchos San Juan Sabinas	2,93	4,05	5,43	6,74	7,80	7,04	6,67	6,54	5,06	4,25	3,75	2,94	5,27
Progreso	3,12	4,04	5,41	6,72	7,87	7,21	6,93	6,67	5,11	4,30	3,90	3,15	5,37
Abasolo y Escobedo	3,01	3,95	5,12	6,31	7,31	6,82	6,43	6,14	4,87	4,03	3,63	3,09	5,06
Rodríguez Escobedo	3,1	3,98	5,11	6,52	7,61	6,97	6,74	6,51	4,89	4,07	3,85	3,10	5,20
Sacramento y Nadadores	3,13	3,76	4,87	6,12	7,19	6,62	6,38	6,17	4,66	5,02	3,89	3,42	5,10
Monclova	2,96	3,94	5,57	6,73	8,02	7,16	6,74	6,55	4,95	4,13	3,99	3,29	5,34
Candela	2,59	3,37	4,81	6,46	7,86	7,12	6,92	6,77	4,99	4,15	3,70	2,88	5,14
La Madrid	3,43	4,42	5,67	6,88	8,12	7,41	6,94	6,77	5,26	4,59	4,40	3,43	5,61
El gato Ndrs. y San B. ventura	3,06	3,94	5,04	6,29	7,64	7,06	6,61	6,32	4,74	4,00	3,77	3,12	5,13
Castaños	2,98	3,93	5,01	6,20	7,84	7,11	6,71	6,50	5,00	4,17	3,76	2,82	5,17
El Márquez Castaños	3,25	4,20	5,42	6,69	7,91	7,05	6,63	6,37	4,99	4,38	4,05	3,21	5,35
Bajan Castaños	3,06	4,05	5,13	6,51	7,75	7,04	6,71	6,42	4,96	4,35	3,97	3,19	5,26
El Taquito Castaños	2,93	3,82	4,98	6,27	7,36	6,63	6,20	5,93	4,53	3,97	3,71	3,01	4,94
Santa Teresa Castaños	3,16	4,07	5,19	6,35	7,58	6,80	6,38	6,12	4,63	4,08	4,00	3,36	5,14